第 41 卷 第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41, No. 2
2023 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Jun., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.02

活动星系核中的准周期振荡现象

李根源[1]，王仲翔[1,2]

(1. 云南大学 物理与天文学院天文系，昆明 650091；　2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030)

摘要： 近年来，在活动星系核的光变曲线中越来越多的准周期振荡现象被发现并报道，而对此类现象的研究很有可能成为一种探索超大质量黑洞物理机制的特殊且有效的手段。首次收集了报道出的准周期振荡事例，并对其分不同波段进行了整理；此外还介绍了不同波段上显著事例的特点并阐明其相关的物理过程。根据所搜集的事例，讨论了它们的整体特点，其中所探测的周期具有很强的观测选择效应，并且至今高可信度的事例不多。目前考虑的准周期振荡的产生机制都与 Lense-Thirring 效应或双黑洞系统有关。相信在不久的将来，随着各类大型巡天项目的开展，会有大量的活动星系核准周期振荡现象被发现，这将有助于对该现象的深入研究。

关　键　词： 活动星系核；多波段；准周期振荡；类星体

中图分类号： P157.6　　　**文献标识码：** A

1 引　言

活动星系核 (active galactic nucleus, AGN) 是由星系中超大质量黑洞的吸积驱动的高能天体物理源，它们呈现出独特的观测特征，可观测频率覆盖二十多个数量级的整个电磁光谱[1]。自 20 世纪 60 年代类星体发现以来，大量具有类似特征的天体陆续被认证发现，它们都是银河系外星系。这些天体都被统称为 AGN，其共同观测特征主要有以下几点[1]：(1) 明亮的致密核区，同时光度很高，远高于普通星系；(2) 光谱表现具有高红移，表明距离在宇宙学尺度上；(3) 具有快速的光变，光变时标从数小时到数日不等，显示其尺度只占整个星系的很小一部分；(4) 光谱中有非常宽的发射线；(5) 具有非热辐射谱；(6) 具有射电或光学喷流现象。

长期以来，AGN 的研究是天文学与天体物理学中最热门和最活跃的领域之一。在过去的几十年里，通过长期的观测研究，AGN 具体分为如下几类，主要有类星体 (QSO)、赛弗特星系 (Seyfert galaxy，其中包括赛弗特 I 型和赛弗特 II 型)、射电星系 (radio galaxy)、光

收稿日期： 2022-06-23；　**修回日期：** 2022-11-29

资助项目： 云南省重点基金 (202201AS070005)；云南省科学项目基金 (2022Y055)

通讯作者： 李根源，ligenyuan@mail.ynu.edu.cn

学剧变类星体 (optically violent variable, OVV)、蝎虎座 BL 型天体 (BL Lac object) 等，其中光学剧变类星体与蝎虎座 BL 型天体又合称为耀变体 (blazar)。而近年来随着观测研究数据的积累和观测设备的不断发展，在多波段上对 AGN 的光变特性开展更加充分的分析研究成为可能，这其中也包括准周期振荡 (quasi-periodic oscillation, QPO) 现象的研究。

QPO 现象首先在 X 射线双星 (X-ray binaries, XRBs) 上被发现。它们是由吸积的恒星质量黑洞或中子星组成。在黑洞 XRBs 中，QPO 通常被分为低频 (LF) QPO 和高频 (HF) QPO，其中 LFQPO 的中心频率小于 30 Hz，而 HFQPO 的中心频率大于 30 Hz[2]。类似的区别也适用于中子星系统，但是所观测到的现象更为复杂。1979 年 Samimi 等人[3]最早提出在 XRBs 中发现了可能的 QPO 现象，其后陆续有类似的事例被报道[4, 5]。而 EXOSAT 和 GINGA 卫星观测数据则清楚表明黑洞[6]和中子星[7, 8]XRBs 存在着 QPO 现象。之后在 1996－2012 年期间运行的罗西 X 射线时变探测器 (Rossi X-ray Timing Explorer) 为研究 XRBs 中的 QPO 提供了丰富的观测数据，对于这类现象的进一步研究起到关键作用。

近年 AGN 中的 QPO 现象受到了更多的关注与探测研究，其中最著名的事例是 OJ287。这颗源由于光学明亮，从 19 世纪末就开始在光学波段上被长期监测 (见图 1)，尽管直到 1968 年才被确认为类星体。长期监测数据显示它有一个约 12 a 的准周期爆发，而且这种爆发似乎都是以 1~2 a 的时间间隔成对出现。人们提出了各种模型来解释其光学光变曲线中的准周期性，例如双黑洞模型[9–11]，吸积盘中的准周期振荡[12]，或是一个没有相对论进动的双黑洞[13–15]。这些模型中，次级黑洞影响主黑洞吸积的模型因为准确地预测了主要爆发的时间而得到认可。最近，Britzen 等人[16]对射电喷流在 pc 尺度上的运动学特性做了详细分析，并认为射电喷流的旋进与黑洞双星的轨道运动有关，而光学活动可能与射电喷流的前行和旋转有关。

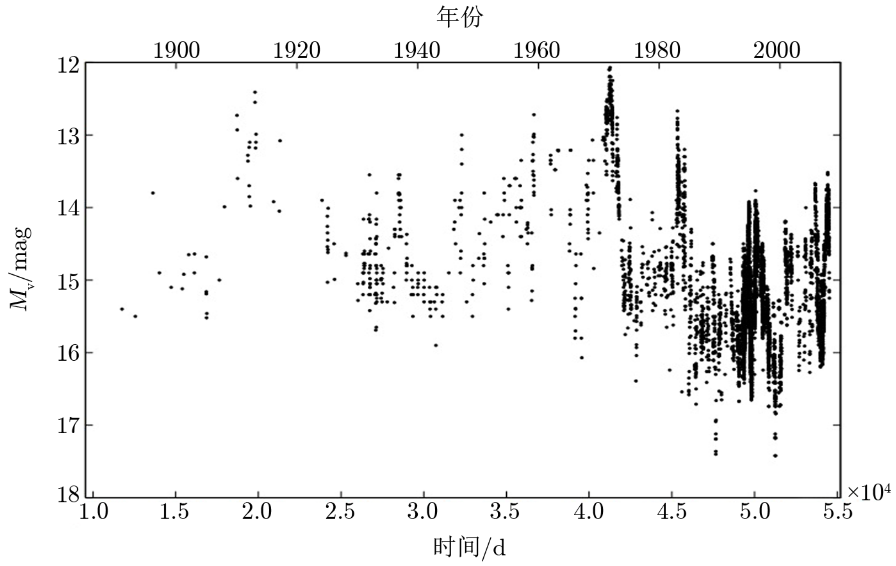


图 1 OJ287 在 V 波段的历史光变曲线[91]

另外要提的是最近几年新发现的准周期爆发 (quasi-periodic eruption, QPE) 现象，它们属于 AGN 周期性光变中较为重要的一类，且有重要的物理意义。QPE 是每隔几小时重复出现一次的极端高振幅的 X 射线辐射爆发，起源于星系核中的中心超大质量黑洞附近。2019 年 Miniutti 等人[17]在 GSN 069 的核中观测到 X 射线 QPE。随后这种特殊的现象在其他源中也被观测到 (RX J1301.9+2747[18], eRO-QPE1 和 eRO-QPE2[19]，以及 XMMSL1 J024916.6-041244[20])。到目前为止，对该类现象的产生机制尚不清楚，但天文学家提出一些理论模型来解释 QPE 现象：改进的圆盘不稳定性模型[21–23]；近乎等质量的超大黑洞双星中的引力透镜现象[24]；来自一个或多个不同配置的轨道体之间的质量转移[25–30]；或者在轨道上运行的次级天体与初始潮汐瓦解事件之后形成的吸积盘之间的碰撞[31, 32]。这些模型的提出对于 QPE 的研究具有重要意义，然而目前 QPE 与 QPO 之间是否有关尚不清楚。

现在，随着各类观测设备的增加和观测能力的持续提高，在多个波段上积累出大量数据，使得人们能够在 AGN 中发现越来越多的 QPO 现象。由于 QPO 被认为揭示的是 AGN 中超大质量黑洞的吸积活动、吸积盘的可能结构特性、双超大质量黑洞系统，所以对它们的研究成为 AGN 相关工作中比较独特的一个热点。我们收集了已被报道的事例，按不同波段分成四个部分并总结在表 1 中。第 2 章分波段描述了迄今为止报道的 QPO 现象的特点；第 3 章根据现今理论研究结合表 1 进行了讨论；第 4 章则进行总结。

2 AGN 的 QPO 现象

2.1 X 射线波段

在 X 射线波段，第一个被广泛讨论的 QPO 事例在 RE J1034+396 中发现。该源是一个红移 $z = 0.042$ 的活动星系，在光谱上被归类为窄线赛弗特 I 型星系。这类天体有很强的发射线，由吸积导致的紫外线和 X 射线辐射电离出的高密度气体产生。2008 年，利用 X 射线卫星 XMM-Newton 的长时间观测数据，Gierliński 等人[33]在 $0.3 \sim 10$ keV 的能段上提取了 RE J1034+396 的光变曲线，在 (3 730±130) s 处发现了一个周期信号峰值。此信号持续了近 16 个周期，折叠的光变曲线中具有显著周期性波动部分，信号的显著度约为 5.6σ。RE J1034+396 的黑洞质量还没有很好地确定，但根据观测到的周期，假设它与黑洞最内区的稳定轨道的开普勒周期有关，则可以估算出黑洞的质量在 $(8 \times 10^6 \sim 9 \times 10^7)M_\odot$ 之间。由于此 QPO 信号的发现，后续引发了对 RE J1034+396 的持续关注研究，Alston 等人[34]通过分析 X 射线档案数据，在 5 个观测任务中 (总持续时间约 250 ks) 发现在 $1.0 \sim 4.0$ keV 硬 X 射线能段也有同样的信号，从而更加证实该信号的真实性。

随后有更多的 QPO 信号在 AGN 的 X 射线波段被发现，它们被报道的周期、显著性、持续周期数等信息见表 1。这其中值得一提的是，在窄线赛弗特 I 型星系 1H 0707-495 中观测到两个分离的暂态 QPO 信号：在 2016 年，Pan 等人[35]根据 2008 年 2 月 4 日之后的光变曲线，在 $(2.6 \pm 0.18) \times 10^{-4}$ Hz 处检测出 QPO 信号，该信号的周期是 $(3\ 800 \pm 170)$ s (4.2σ 显著性)；随后在 2018 年，Zhang 等人[36]对这个源重新进行了分析，除了证

实之前的发现，还在 2008 年 2 月 4 日之前的观测数据中检测出一个新的信号，该信号在 $(1.2\pm0.2)\times10^{-4}$ Hz 的显著性为 4σ。这两个信号的比为 2:1，是第一次在 AGN 的 X 射线辐射中观测到两个由中间状态分开的 QPO 信号。

2.2 γ 射线波段

费米 γ 射线空间望远镜于 2008 年升空并开始观测，其上的大面积望远镜 (Large Area Telescope, LAT) 在 $0.1\sim500$ GeV 能段上对全天进行扫描观测，所以 LAT 除了能探测 γ 射线源还能对它们进行长期监测，成为一架研究光变 (包括发现 QPO 现象) 的强力设备。在 2015 年，费米组使用 6.9 年 LAT 观测数据，在耀变体 PG 1553+113 的 γ 射线辐射中发现了 (2.18±0.08) a 周期的 QPO 信号[37]。射电、光学等波段的同时观测数据也表明可能存在相关的振荡。这一发现触发了广泛的讨论和后随研究，其中包括利用费米 LAT 数据进行高能 QPO 搜寻的工作[38–41]。另外，Penil 等人[42]对约 2 000 颗 AGN 9 年的费米数据进行了系统分析，从中找到了 11 颗具有 QPO 信号的候选源 (其中包括 2 颗已被报道的)，但他们的样本信号显著性相对较弱且没有具体信息。

由于 AGN 中心的物理尺度，其中 QPO 的起源无论是双黑洞系统还是吸积盘，变化的时标多在年量级，而起初利用费米 LAT 所发现的 QPO 周期为 $1\sim3$ a。但 2016 年 10 月，耀变体 PKS 2247-131 被观测到一次 γ 射线爆发，Zhou 等人[43]通过对该源爆发期间的 γ 射线光变曲线的研究，发现存在周期约为 34 d 的 QPO 信号 (4.6σ 显著性)。这一信号明显短于之前数例年量级的高能 QPO。Zhou 等人用喷流的螺旋结构来解释此信号的产生机制，喷流中主发射团块进行螺旋运动，导致我们对其视角经历周期性变化，由于多普勒效应使得观测到的流量也有相应的周期变化。

另外值得提出的是，可能由于年量级的周期性，所以费米 LAT 数据只能覆盖几个循环周期的 QPO 信号，使得在 γ 射线能段发现的 QPO 信号的显著性不强，仅为 3σ。基于该缺点，Sandrinelli 等人[44–46]强调多波段同时探测以增强真实性，他们也开展了相应的工作。

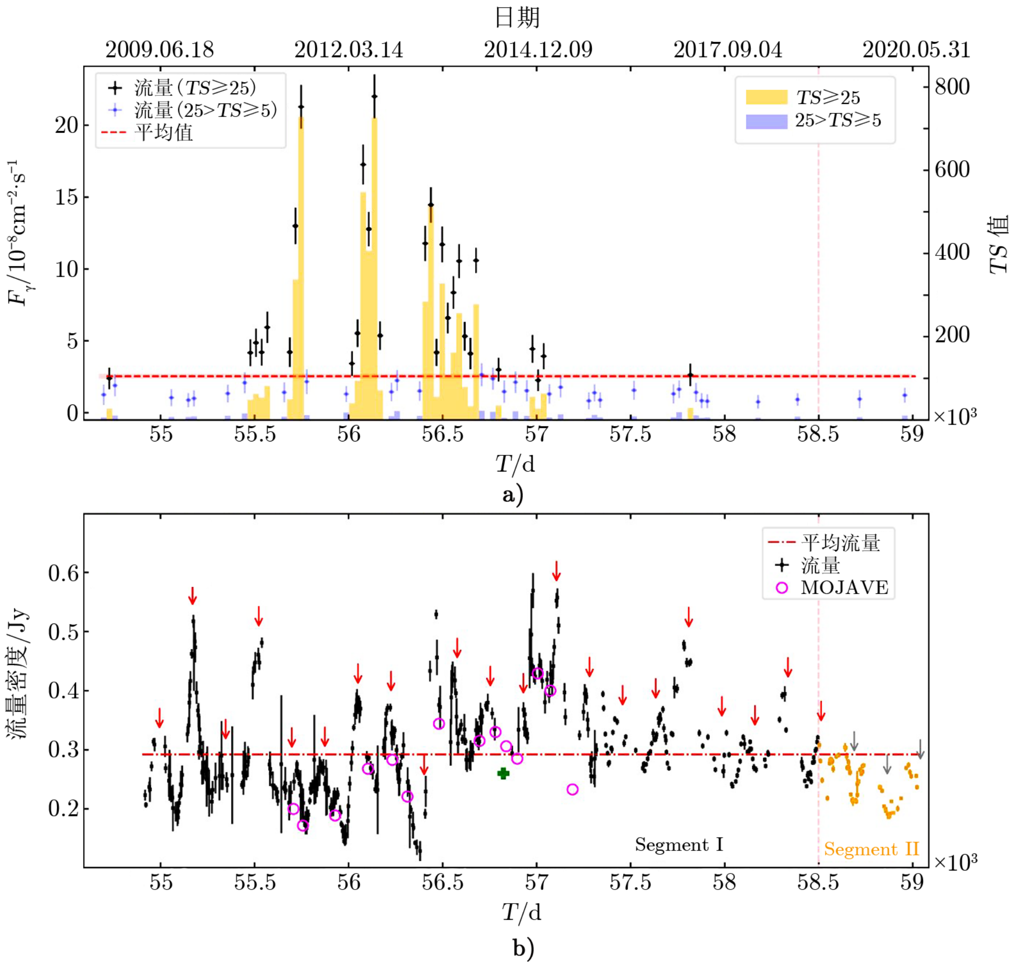
2.3 射电波段

由于费米 LAT 能对全天的耀变体进行监测，因此国际上一些天文台站开始开展其他波段的监测，目的是结合 γ 射线与多波段观测信息更整体地研究这些 AGN 的光变及背后的物理机制。在射电波段采取这一方法的主要有美国加州理工的欧文斯谷射电天文台 (Owens Valley Radio Observatory, OVRO) 的 40 m 望远镜。此望远镜自 2008 年以来一直在 15 GHz 监测 1 200 多颗 AGN，积累了大量的射电光变数据，从而为 QPO 的发现提供了所需的长期监测数据。

利用其数据，在平谱射电类星体 J1359+4011 的 15 GHz 光变中[47]发现了射电 QPO。该源的光变曲线显示，在 4 年的时间内，QPO 振荡的周期在 $120\sim150$ d 之间变化。此 QPO 周期的时间尺度在考虑 AGN 黑洞质量的范围后，可以与 X 射线波段观测到的黑洞双星中的 LFQPO 相比，由此可以将该信号的起源解释为类似于银河系微类星体的 LFQPO，或者解释为吸积盘的热不稳定性对吸积流进行调制的结果。

之后又有数个射电 QPO 被发现。而其中最为显著的是在射电噪窄线赛弗特 I 型星系

J0849+5108 中发现的周期约 176 d 的 QPO 信号[48]。通过 OVRO 的观测数据发现，在 2009 年 3 月至 2020 年 6 月期间，该 QPO 信号持续了 21 个循环周期之多，直至 2019 年 1 月之后消失，显著性 $>5\sigma$。与其他 QPO 信号事例相比，可以说几乎是持续周期最多的一例 (见图 2)，极大地证明了 AGN 中 QPO 现象的真实性。另外，通过对比该 AGN 的射电和 γ 射线光变曲线可以看出，射电光变可能包含着两个成分：一个是光变的 QPO 信号，另一个与 γ 射线耀发相关。



注：J0849+5108 中的射电 QPO 信号见图下栏，QPO 信号的波动峰值位置由红色箭头标出，在 MJD 58500 后信号消失[48]。

图 2　a) **表示** 0.1 ~ 500 GeV **的** γ **波段的光变曲线；**b) **表示** OVRO 40 m **望远镜给出的** 15 GHz **光变曲线**

最近，新发现一个在频率稍高的毫米波的比较奇特 QPO 信号。位于 Perseus 星系团中心的著名星系 NGC 1275 (或称 3C 84)，包括毫米波在内的多波段长期观测显示，此星系中心区域在 2002−2017 年期间表现出长期流量上升的趋势，而在这一时期的 1.3 ms 光变曲线

则被发现存在一个双周期的 QPO 信号[49]。主周期约 345 d，而次周期约 386 d，两个周期持续了约 13 个循环，显著性均超过 5σ。这种双周期现象表现出 QPO 的多样性，且类似于银河系 XRB 系统中经常看到的轨道周期加上一个约 10 倍轨道周期的长周期现象，即 NGC 1275 的主周期类似于轨道周期，而次周期则是主周期和长周期的拍频[49]。

2.4 光学波段

光学波段除了上文提到的 OJ 287 事例，近年来由于大型暂现源巡天搜寻项目的开展和推进，例如 CRTS (Catalina Real-time Transient Survey)[50], Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)[51, 52] 以及 PTF (Palomar Transient Factory)[53]，在获得的海量数据里报道发现了许多 AGN 周期性变化事例。其中最著名的是在类星体 PG 1302-102[54] 光变曲线中一个周期为 (1 884±88) d 的信号，其光变曲线可以用一个正弦波拟合，振幅为 0.14 mag。信号稍弱的类似事例有上百例，例如 Graham 等人[50]、Charisi 等人[53] 及 Liu 等人[52] 的报道。对于这类事例，研究者通常考虑它们是双超大质量黑洞系统的轨道周期信号，只用周期性而不是 QPO 来描述，所以它们的起源尚不明确。

除了上述的周期性事例报道，光学波段报道的 QPO 相对较少，主要集中在耀变体中。它们有 S5 0716+714[55], W2R 1926+42[56], CTA 102[57], 3C 66A 和 B2 1633+38[58]。对于最后两个耀变体，Otero-Santos 等人在分析光学光变曲线的同时，还分析了偏振光的强度变化曲线，并在 B2 1633+38 中发现了一个 1.9 a 周期的 QPO 信号，其同时存在于两类变化曲线中，信号显著性分别在 $3\sigma \sim 5\sigma$ 和 $2\sigma \sim 4\sigma$ 之间。虽然偏振强度变化信号的显著性不高，但其是首次在偏振光中发现的 QPO 信号，可能揭示了耀变体喷流磁场的螺旋结构。

3 讨 论

上述收集整理的 QPO 事例总结在表 1 中。我们这里想指出的是，AGN 中 QPO 的搜寻研究是个正在相对蓬勃发展的方向，在完成此文的过程中，我们注意到不断有新的事例被报道，所以本文所收集的 QPO 事例肯定不是完全的，但这些事例具有代表性地展示了 QPO 的特点。下面首先根据所搜集的 QPO 事例讨论了它们的相关特点，然后又简要地讨论了 QPO 的可能产生机制。

表 1　AGN 中的 QPO 事件

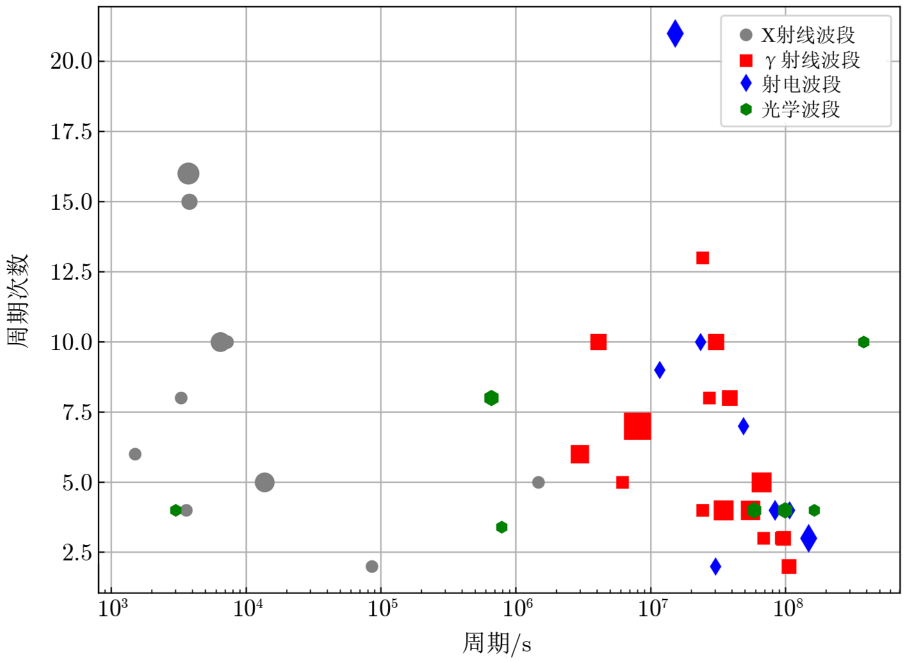
源	周期	显著性/σ	持续周期/cycle	参考文献
	X 射线			
RXJ1301.9+2747	$\simeq$ 1 500 s	3	6	[69]
3C 273	3 300 s	3	8	[70]
MCG-06-30-15	(3 600±229) s	3	4	[71]
RE J1034+396	(3 730±130) s	5.6	16	[33, 72]
1H 0707-495	(3 800±170) s	4	15	[35]
Mrk 766	6 450 s	5	10	[73]

(续表)

源	周期	显著性/σ	持续周期/cycle	参考文献
MS 2254.9-3712	$\simeq$ 2 h	$\simeq$ 3.3	10	[74]
J1231+1106	$\simeq$ 3.8 h	$\simeq$ 5	5	[75]
XMMU J134736.6+173403	(23.82±0.07) h	3	—	[76]
AO 0235+164	(17±1) d	3	5	[77]
1ES 2321+419	(425±10) d	3	4	[77]
	γ 射线			
PKS 2247-131	(34.5±1.5) d	4.6	6	[43]
3C 454.3	(47.4±0.9) d	4.1	10	[78]
B2 1520+31	$\simeq$ (71.4±0.5) d	$\simeq$ 3	5	[79]
PKS 1510-089	3.6 d	$\simeq$ 3.5	5	[80]
	(92±1.2 d)	$\simeq$ 7.0	7	
Mrk 421	280 d	3	13	[81]
PKS 0537-441	$\simeq$ (280±39) d	$\simeq$ 3	4	[44, 45]
OJ 287	314 d	3	8	[82]
PKS 1424-418	353 d	4	10	[81]
PKS 0521-36	$\simeq$ (1.1±0.1) a	$\simeq$ 5	4	[84]
PKS 0601-70	(1.22±0.06) a	$\simeq$ 3.9	8	[41]
PKS 2155-304	(1.74±0.13) a	4.9	4	[40]
PKS 0301-243	$\simeq$ (2.1±0.3) a	$\simeq$ 5	5	[39]
PG 1553+113	(2.18±0.08) a	$\simeq$ 3	3	[37]
ON +325	1 070 d	3	3	[81]
S5 1044+71	(3.06±0.43) a	3.6	3	[83]
PKS 0426-380	(3.35±0.68) a	3.6	2	[38]
	射电			
J 1359+4011	120~150 d	—	9	[47]
J 0849+5108	(175.93±6.34) d	$\simeq$ 5	21	[48]
PKS 0219-164	(270±26) d	3	10	[85]
PKS B0048-097	350 d	3	—	[86]
J 1043+2408	(563±49) d	3	7	[87]
AO 0235+164	(965±50) d	3.5	4	[88]
PKS J0805-0111	(3.38±0.8) a	>3	4	[89]
PKS J2134-0153	(4.69±0.14) a	>5	3	[90]
	光学			
S5 0716+714	50 min	3	4	[55]
CTA 102	(7.6±0.3) d	4	8	[57]
W2R 1926+42	9.1 d	3	3.4	[56]
B2 1633+38	(1.85±0.17) a	4	4	[58]
3C 66A	(3.14±0.24) a	4	4	[58]
PG 1302-102	(1 884±88) d	—	4	[54]
OJ 287	12 a	—	—	[91]

3.1 QPO 的特点

根据表 1 统计的 QPO 信息，我们在图 3 绘制了它们的周期、持续周期次数以及显著性。从图 3 可以看出两个特点：(1) 这些 QPO 的周期大致可分为两类，大部分发现在 X 射线能段的短周期 ($10^3 \sim 10^4$ s) 以及在 γ 射线能段及射电能段的长周期 ($1 \sim 3$ a)。这很可能是由于观测波段以及数据的限制导致的选择效应。由于灵敏度高的在轨 X 射线望远镜 (即 XMM-Newton 或 Chandra) 时间有限，单次曝光时间基本在 $10 \sim 1\,000$ s 范围内，因此 X 射线能段探测 QPO 极其困难[59]，且至今发现的只是短周期的信号。(2) 以费米为主的 γ 射线望远镜灵敏度有限，对于绝大多数源无法构建高时间分辨率的光变曲线，所以找到的 QPO 信号大都是以年为量级。另外 γ 射线和射电观测的大都是耀变体喷流的流量变化，如果相信 QPO 的真实性，相关的 QPO 产生的物理机制也要求至少年量级的长时间尺度 (见 3.2 节中物理机制讨论)。



注：小符号表示显著性在 $3\sigma \sim 5\sigma$ 之间的源，大的则表示显著性大于 5σ 的源；其中灰色是 X 射线波段探测到的 QPO 事件，红色是 γ 射线波段探测到的 QPO 事件，蓝色是射电波段探测到的 QPO 事件，绿色是光学波段探测到的 QPO 事件。

图 3　活动星系核中 QPO 的周期与持续周期次数的统计

我们注意到，光学波段既有短时标小时到天量级的 QPO 报道，又有长达数年的 QPO。这反映了现今 CRTS (Catalina Real-time Transient Survey) 等大型暂现源巡天项目的长时间大天区检测能力，能够兼顾到时标在几个量级范围内的变化。

图 3 所显示的第二个特点是，目前所探测到的 QPO 多数显著性不高且持续周期数不

多。实际上，Yang 等人[60]分析了所报道的 γ 射线 QPO 并发现这些源的光变，除了 PKS 0537-441 和PG 1553+113，大都可以用高斯过程来描述，可能是由于 QPO 周期相对观测时间来说比较长 (类似于 X 射线由于观测时间短，而在 γ 射线由于 QPO 周期长)，所能覆盖的持续周期数比较小，使得信号比较弱。当然也不能排除所报道的 QPO 事例中的确存在由随机过程造成的假信号。所以 J0849+5108 中的射电 QPO 信号 (见图 2) 探测显得尤为可贵，其长持续周期确保了年量级 QPO 信号的真实存在性。

3.2 QPO 的产生机制

年量级的 QPO 信号多数是在射电或 γ 射线能段探测到的，信号的产生很可能来自喷流，反映了喷流辐射流量的准周期变化。这样喷流应该是进动的[61]；或者在耀变体中当喷流方向与观测者视线方向几乎一致时，喷流主辐射团块具有螺旋运动轨迹[43]。对于后者，理论研究和观测结果都表明喷流结构和磁场都具有螺旋形态[62, 63]，所以耀变体类的 QPO 现象有可能反映的是喷流的内在结构。对于前者，有两种可能性。第一种是参考类比于银河系 XRBs 中的 QPO 产生机制，其中主要考虑的是 Lense-Thirring 效应 (或惯性系拖曳效应)[64]；在此效应作用下，吸积流围绕着自旋的黑洞进动，因此喷流也相应进动，这一过程在相对论性磁流体数值模拟中被清晰地展现出来[65]。第二种则是被广泛讨论的双黑洞系统，喷流从其中之一产生，由于其轨道运动，喷流方向会有相应的微小变化，导致观测到的准周期变化[66]。

对于时间为千秒量级的短 QPO 信号，目前大都考虑与 XRBs 中的 QPOs 进行类比，如 Gierliński 等人[33]所讨论的，考虑到 QPO 信号来自于黑洞附近，反映的是环绕黑洞的轨道周期；或者与 LFQPOs 或 HFQPOs 相比较，相比于 $10M_{\odot}$ 左右的恒星级质量黑洞，AGN 中黑洞质量约为 $(10^5 \sim 10^8)M_{\odot}$，如果 QPO 频率与黑洞质量成反比，AGN 的 QPO 频率约是 10^{-4} Hz (假设几赫兹的 LFQPOs)。如果这一类比是恰当的，此类 QPO 的具体产生机制很可能是由于 Lense-Thirring 效应对黑洞附近吸积流的影响，具体模型的讨论可见参考文献 [64]。

4 总结和展望

随着近年来设备观测能力的持续提高，在 AGN 中越来越多的 QPO 事例被发现并报道，我们统计已发表的文献，收集整理了不同波段 (射电、光学、X 射线和 γ 射线) 上被较好认证的 QPO 事例。这些事例展现了至今所报道的 QPO 信号的特点，其中观测选择效应比较强，短曝光时间的 X 射线观测发现的多是千秒量级的信号，而长期监测型观测 (如 γ 射线和射电波段) 发现的多是年量级的信号。在这些事例中，部分显著性不强，可能如一些研究所示，只是随机过程造成的假信号，但其中也有持续循环周期长的，保证了 AGN 中 QPO 现象的真实性。现在有更多新观测设备的建成使用和已有设备的改造升级，如正在运行观测的 X 射线巡天望远镜 eROSITA (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array)[67]和光学波段多个正在开展或在建的大型巡天项目 (例如目前正在运行的

Zwicky Transient Facility[68] 、中国云南大学的多通道测光巡天望远镜及美国主导的 Legacy Survey of Space and Time 项目)，它们将在不久的将来产生海量的多波段数据。这些数据肯定能促进更多高显著性和多类型的 QPO 事例的发现，这对比较清楚地理解 QPO 现象及它们所揭示的物理过程具有重要的作用。

致谢

感谢审稿人对此文章提出的详细修改意见，也感谢任崇阳对此文的阅读和建议。

参考文献：

[1] Padovani P, Alexander D M, Assef R J, et al. A&ARv, 2017, 25: 2
[2] Belloni T M. Lecture Notes in Physics: Berlin Springer Verlag, 2010, 794: 53
[3] Samimi J, Share G H, Wood K, et al. Nature, 1979, 278: 434
[4] Motch C, Ricketts M J, Page C G, et al. A&A, 1983, 119: 171
[5] van der Klis M, Jansen F, van Paradijs J, et al. Nature, 1985, 316: 225
[6] Miyamoto S, Kimura K, Kitamoto S, et al. ApJ, 1991, 383: 784
[7] van der Klis M. ARA&A, 1989, 27: 517
[8] Middleditch J, Priedhorsky W C. ApJ, 1986, 306: 230
[9] Lehto H J, Valtonen M J. ApJ, 1996, 460: 207
[10] Dey L, Gopakumar A, Valtonen M, et al. Universe, 2019, 5: 108
[11] Valtonen M J, Zola S, Pihajoki P, et al. ApJ, 2019, 882: 88
[12] Igumenshchev I V, Abramowicz M A. MNRAS, 1999, 303: 309
[13] Katz J I. ApJ, 1997, 478: 527
[14] Villata M, Raiteri C M, Sillanpaa A, et al. MNRAS, 1998, 293: L13
[15] Valtaoja E, Teräsranta H, Tornikoski M, et al. ApJ, 2000, 531: 744
[16] Britzen S, Fendt C, Witzel G, et al. MNRAS, 2018, 478: 3199
[17] Miniutti G, Saxton R D, Giustini M, et al. Nature, 2019, 573: 381
[18] Giustini M, Miniutti G, Saxton R D. A&A, 2020, 636: L2
[19] Arcodia R, Merloni A, Nandra K, et al. Nature, 2021, 592: 704
[20] Chakraborty J, Kara E, Masterson M, et al. ApJ, 2021, 921: L40
[21] Sniegowska M, Czerny B, Bon E, et al. A&A, 2020, 641: A167
[22] Raj A, Nixon C J. ApJ, 2021, 909: 82
[23] Pan X, Li S L, Cao X, et al. ApJ, 2022, 928: L18
[24] Ingram A, Motta S E, Aigrain S, et al. MNRAS, 2021, 503: 1703
[25] King A. MNRAS, 2020, 493: L120
[26] King A. MNRAS, 2022, 515: 4344
[27] Metzger B D, Stone N C, Gilbaum S. ApJ, 2022, 926: 101
[28] Zhao Z Y, Wang Y Y, Zou Y C, et al. A&A, 2022, 661: A55
[29] Nixon C J, Coughlin E R. ApJ, 2022, 927: L25
[30] Wang M, Yin J, Ma Y, et al. ApJ, 2022, 933: 225
[31] Suková P, Zajaček M, Witzany V, et al. ApJ, 2021, 917: 43
[32] Landry P, Read J S. ApJ, 2021, 921: L25
[33] Gierlinski M, Middleton M, Ward M, Done C. Nature, 2008, 455: 369
[34] Alston W N, Markeviciute J, Kara E, et al. MNRAS, 2014, 445: L16
[35] Pan H W, Yuan W, Yao S, et al. ApJ, 2016, 819: L19

[36] Zhang P F, Zhang P, Liao N H, et al. ApJ, 2018, 853: 193
[37] Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. ApJ, 2015, 813: L41
[38] Zhang P F, Yan D H, Liao N H, et al. ApJ, 2017, 842: 10
[39] Zhang P F, Yan D H, Zhou J N, et al. ApJ, 2017, 845: 82
[40] Zhang P F, Yan D H, Liao N H, Wang J C. ApJ, 2017, 835: 260
[41] Zhang P F, Yan D H, Zhou J N, et al. ApJ, 2020, 891: 163
[42] Peñil P, Domínguez A, Buson S, et al. ApJ, 2020, 896: 134
[43] Zhou J, Wang Z, Chen L, et al. Nature Communications, 2018, 9: 4599
[44] Sandrinelli A, Covino S, Treves A. ApJ, 2016, 820: 20
[45] Sandrinelli A, Covino S, Dotti M, et al. AJ, 2016, 151: 54
[46] Sandrinelli A, Covino S, Treves A, et al. A&A, 2017, 600: A132
[47] Balokovic M, Hovatta T, King O, et al. GRB Coordinates Network, 2013, 1: 15430
[48] Zhang P, Wang Z. ApJ, 2021, 914: 1
[49] Zhang P, Wang Z, Gurwell M, et al. ApJ, 2022, 925: 207
[50] Graham M J, Djorgovski S G, Stern D, et al. MNRAS, 2015, 453: 1562
[51] Liu T, Gezari S, Heinis S, et al. ApJ, 2015, 803: L16
[52] Liu T, Gezari S, Ayers M, et al. ApJ, 2019, 884: 36
[53] Charisi M, Bartos I, Haiman Z, et al. MNRAS, 2016, 463: 2145
[54] Graham M J, Djorgovski S G, Stern D, et al. Nature, 2015, 518: 74
[55] Hong S, Xiong D, Bai J. AJ, 2018, 155: 31
[56] Mohan P, Gupta A C, Bachev R, et al. MNRAS, 2016, 456: 654
[57] Sarkar A, Kushwaha P, Gupta A C, et al. A&A, 2020, 642: A129
[58] Otero-Santos J, Acosta-Pulido J A, Becerra González J, et al. MNRAS, 2020, 492: 5524
[59] Vaughan S, Uttley P. MNRAS, 2005, 362: 235
[60] Yang S, Yan D, Zhang P, et al. ApJ, 2021, 907: 105
[61] Rieger F M. ApJ, 2004, 615: L5
[62] Marscher A P, Jorstad S G, D'Arcangelo F D, et al. Nature, 2008, 452: 966
[63] Chen L, Zhang B. ApJ, 2021, 906: 105
[64] Ingram A R, Motta S E. New Astronomy Reviews, 2019, 85: 101524
[65] Liska M, Hesp C, Tchekhovskoy A, et al. MNRAS, 2018, 474: L81
[66] Sobacchi E, Sormani M C, Stamerra A. MNRAS, 2017, 465: 161
[67] Predehl P, Andritschke R, Arefiev V, et al. A&A, 2021, 647: A1
[68] Bellm E C, Kulkarni S R, Graham M J, et al. PASP, 2019, 131: 018002
[69] Song J R, Shu X W, Sun L M, et al. A&A, 2020, 644: L9
[70] Espaillat C, Bregman J, Hughes P, et al. ApJ, 2008, 679: 182
[71] Gupta A C, Tripathi A, Wiita P J, et al. A&A, 2018, 616: L6
[72] Middleton M, Done C, Ward M, et al. MNRAS, 2009, 394: 250
[73] Zhang P, Zhang P F, Yan J Z, et al. ApJ, 2017, 849: 9
[74] Alston W N, Parker M L, et al. MNRAS, 2015, 449: 467
[75] Lin D, Irwin J A, Godet O, et al. ApJ, 2013, 776: L10
[76] Carpano S, Jin C. MNRAS, 2018, 477: 3178
[77] Rani B, Wiita P J, Gupta A C. ApJ, 2009, 696: 2170
[78] Sarkar A, Gupta A C, Chitnis V R, et al. MNRAS, 2021, 501: 50
[79] Gupta A C, Tripathi A, Wiita P J, et al. MNRAS, 2019, 484: 5785
[80] Roy A, Sarkar A, Chatterjee A, et al. MNRAS, 2022, 510: 3641
[81] Bhatta G, Dhital N. ApJ, 2020, 891: 120
[82] Kushwaha P, Sarkar A, Gupta A C, et al. MNRAS, 2020, 499: 653
[83] Wang G G, Cai J T, Fan J H. ApJ, 2022, 929: 130
[84] Zhang H, Yan D, Zhang P, et al. ApJ, 2021, 919: 58

[85] Bhatta G. ApJ, 2017, 847: 7
[86] Kadler M, Hughes P A, Ros E, et al. A&A, 2006, 456: L1
[87] Bhatta G. Galaxies, 2018, 6: 136
[88] Tripathi A, Gupta A C, Aller M F, et al. MNRAS, 2021, 501: 5997
[89] Ren G W, Zhang H J, Zhang X, et al. A&A, 2021, 21: 075
[90] Ren G W, Ding N, Zhang X, et al. MNRAS, 2021, 506: 3791
[91] Valtonen M J, Lehto H J, Nilsson K, et al. Nature, 2008, 452: 851
[92] uberlak K L, Ivezić Ž, MacLeod C. ApJ, 2021, 907: 96

Quasi-periodic Oscillations in Active Galactic Nucleis

LI Gen-yuan[1], WANG Zhong-xiang[12]

(1. Department of Astronomy, School of Physics and Astronomy, Key Laboratory of Astroparticle Physics of Yunnan Province, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: In recent years, many cases of the quasi-periodic oscillation penomenon have been discovered in the light curves of active galactic nuclei, and the study may provide a particularly useful way to explore the physics of the supermassive black holes in the center. We collect these reported quasi-periodic oscillation cases in different bands, and summarize them in this paper. Based on the collected cases, we discuss their overall characteristics, among which the detected periods have a strong observational selection effect and there are few cases with high significance so far. We briefly discuss the mechanisms for producing quasi-periodic oscillations currently under consideration, most of which are related to the Lenense -Thirring effect or binary nature of the central black hole systems. We believe that a large number of quasi-periodic oscillations will be discovered in the near future with the launch of various large-survey programs at different wavelength bands.

Key words: active galactic nuclei; multi-band; quasi-periodic oscillations; QSO